

超新星残骸の折れ曲がったガンマ線 スペクトルについての研究

花 畑 義 隆

〈広島大学理学研究科 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1〉
e-mail: hanabata@hep01.hepl.hiroshima-u.ac.jp



花 畑



片 桐

片 桐 秀 明

〈茨城大学理学部 〒310-8512 茨城県水戸市文京 2-1-1〉
e-mail: katagiri@mx.ibaraki.ac.jp

超新星残骸では、衝撃波においてフェルミ加速というメカニズムによって宇宙線が高エネルギーまで加速されていると考えられてきました。近年、フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡のギガ電子ボルト ($\text{GeV}=10^9 \text{ eV}$) 帯域観測により、分子雲と相互作用した超新星残骸から宇宙線陽子起源と考えられるガンマ線が検出されました。興味深いことに、いくつかの超新星残骸のガンマ線スペクトルには折れ曲がりが存在していました。これは加速された宇宙線のスペクトルが折れ曲がっていることを意味し、フェルミ加速から予想されるものと大きく異なっています。この折れ曲がりの起源についてはいくつかの機構が提唱されていますが、フェルミ衛星で超新星残骸 G8.7-0.1 と白鳥座ループを観測した結果、周辺環境の違いなどで起源が異なるという示唆が得られました。

1. はじめに

宇宙線は、宇宙から飛来する高エネルギーの荷電粒子です。地球近傍の宇宙線は人工衛星で測定されており、主成分は陽子であることがわかっています。銀河系内の宇宙線の平均エネルギー密度は約 1 eV/cc です。これは宇宙背景放射、星からの光、星間磁場や星間物質のエネルギー密度に匹敵し、銀河系の基本的な構成要素になっています。しかしながら、その起源の詳細はいまだ明らかでなく、その解明は宇宙物理学における重要な課題となっています。

銀河系内の宇宙線加速源は、恒星進化の最終段階でその星の大部分を吹き飛ばす爆発現象である超新星爆発の残骸 (SNR) が、その爆発エネ

ギーの大きさから有力視されてきました。近傍銀河の可視光観測による結果からわれわれの銀河で 100 年に 1 度超新星爆発が起こると仮定し、さらに SNR において何らかの機構で爆発エネルギーの約 10% が宇宙線へ供給されると仮定すると、銀河宇宙線がもつエネルギー総量を説明できます。爆発エネルギーの転換機構としては、1970 年代の終わりに「衝撃波統計加速」(フェルミ加速) という加速機構が提唱されています¹⁾。超新星爆発に伴い爆発噴出物が星間空間へと秒速約 1 万 km で吹き飛ばされて強い衝撃波が形成されますが、SNR の衝撃波近傍で運動する粒子は磁場の波の揺らぎによって何度も散乱されて高エネルギーまで加速されます。その結果、図 1 で示すように単一のべき型スペクトルになることが予言

されました。

宇宙線陽子が加速されている証拠は、特徴的なスペクトルが現れる GeV (=10⁹ eV) 帯域のガンマ線を検出することで得られます。しかし、検出感度が不足していたため、ごく最近まで詳細なスペクトルは得られていませんでした。この状況を打破したのが2008年に打ち上げられたフェルミ衛星 LAT (=Large Area Telescope) 検出器²⁾です。0.02–300 GeV という幅広い帯域を感度よく観測できるようになり、多数の SNR から GeV ガンマ線が検出されました。特に分子雲と相互作用した SNR では、ガンマ線光度が非常に高く、陽子と分子雲中の原子核との反応で生じる中性パイ中間子の崩壊ガンマ線でスペクトルを自然に説明できることがわかりました^{3),4)}。興味深いことに、いくつかの SNR で得られたガンマ線スペクトルは GeV 帯域で折れ曲がりをもっていました^{3),4)}。これは、ガンマ線放射の起源になっている宇宙線スペクトルも折れ曲がっていることを示しています。フェルミ加速で予言される宇宙線スペクトルには、図1に示すようにそのような折れ曲がりはありません。

この折れ曲がりの起源については、図2に示すように現在大きく分けて三つのモデルが提唱されています。一つ目は、衝撃波で加速された宇宙線が時間が経つにつれて高エネルギーのものから徐々に逃げ出し、近傍の分子雲で相互作用するという拡散説です^{5),6)}。二つ目は、衝撃波が突入している分子雲中の中性粒子と加速された宇宙線イオンとの相互作用で磁場の波が減衰し、高エネルギーの宇宙線が逃げ出すという磁場消失説です⁷⁾。三つ目は、衝撃波が非一様な星間物質と衝突することで生じた反射衝撃波により宇宙線が再加速されるという反射衝撃波説です⁸⁾。現在、どのモデルがもっともらしいかはわかっていませんが、スペクトルの折れ曲がりの起源を調べることで、衝撃波における宇宙線加速機構や宇宙線の星間空間への放出過程の理解につながります。今回われわれは、この折れ曲がりの起源を探るためにフェルミ衛星（以降、フェルミと略します）を用いて SNR G8.7–0.1⁹⁾ と白鳥座ループ¹⁰⁾ を観測し、周辺環境などを考慮して、それぞれでの機構が働いているのか検証を行いました。本稿ではこれらの結果について紹介します。

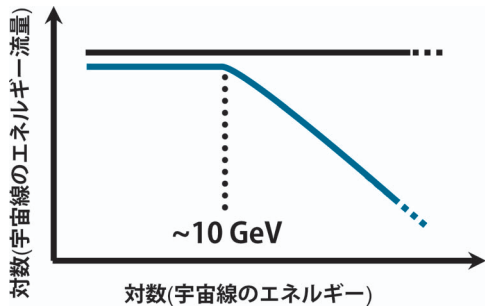


図1 フェルミ加速から予想される宇宙線のスペクトル(黒)と、分子雲と相互作用した SNR の観測で得られた GeV 帯域で折れ曲がった宇宙線陽子のスペクトル(青)の模式図。

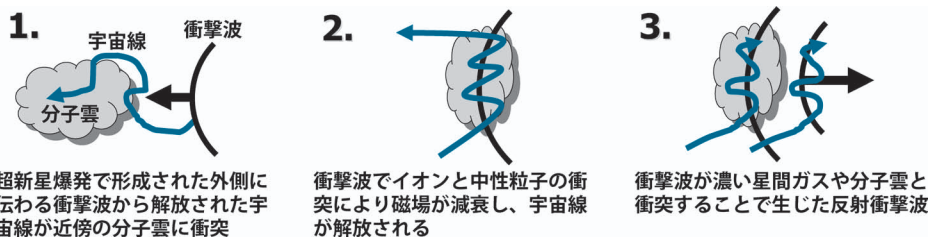


図2 SNR のガンマ線スペクトルに折れ曲がりを作る機構の諸説。1. 拡散説, 2. 磁場消失説, 3. 反射衝撃波説

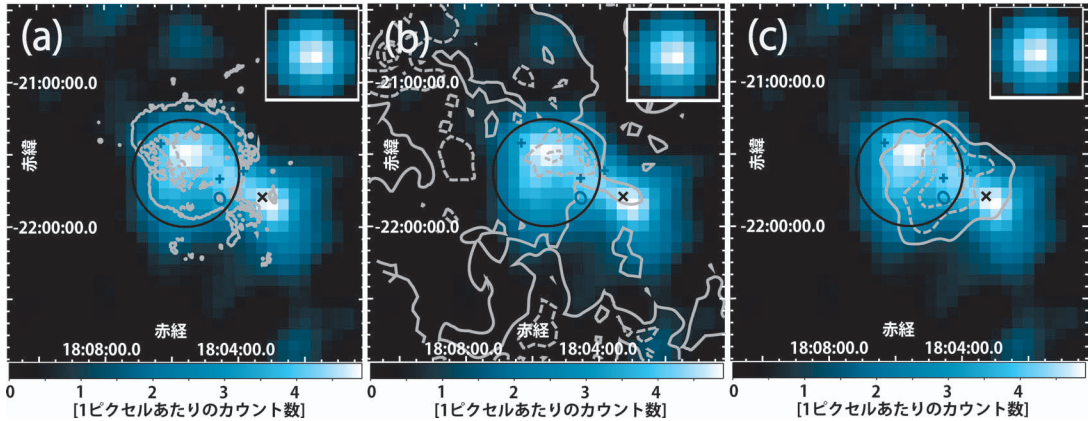


図3 SNR G8.7-0.1のバックグラウンドを差し引いた2-10 GeVのLATのイメージ。黒○はソースEの広がりの大きさ、黒×はソースWの位置を表す。青+は電波やX線で検出されているパルサーの位置、青○はSNR G8.31-0.09の位置を表す。グレーの等高線は、(a)は電波 (VLA 90 cm) の強度分布¹⁶⁾、(b)はNANTEN望遠鏡の観測¹⁹⁾で得られたG8.7-0.1の距離付近にある分子雲からの¹²CO ($J=1-0$) 輝線の強度分布、(c)はTeVガンマ線未同定天体HESS J1804-214の強度分布を表す。各パネルの右上にはLATでの点源像の広がりを示す。

2. G8.7-0.1

2.1 G8.7-0.1からのGeVガンマ線

G8.7-0.1は、星形成領域W30に位置する¹¹⁾、年齢が約2万5千年程度¹²⁾の中年のSNRです。電波観測からシェル状の電子のシンクロトロン放射が検出されており¹³⁾、宇宙線が加速されると期待できます。また、近傍には分子雲が存在し、衝突励起で放出されるOHレーザーが検出されていることからG8.7-0.1が分子雲に衝突していると予想されます¹⁴⁾。さらに興味深いことに、G8.7-0.1の近傍にはTeV ($=10^{12}$ eV= 10^3 GeV)ガンマ線未同定天体であるHESS J1804-216が存在しています¹⁵⁾。このようなTeVガンマ線だけで輝く天体は、SNRから逃げ出した宇宙線とSNRから100パーセク程度の距離にある分子雲との相互作用によって生じる可能性があることが理論的に示されています⁶⁾。したがって、G8.7-0.1とHESS J1804-216との関係を調べることは宇宙線の拡散する過程を研究するうえで非常に重要となります。

まず最初に、筆者らはG8.7-0.1からのGeVガンマ線の放射分布について調べました。図3はLATで得られた2-10 GeVのイメージで、図3(a)は電波放射の強度分布を重ねたものです。GeVガンマ線源は広がった東部の放射(ソースE)と点源モデルで表される西部の放射(ソースW)でよく再現できますが、ソースEは電子のシンクロトロン放射の分布とよく相関していることがわかります。ソースEの周辺にはいくつかパルサーが存在しますが、ガンマ線でパルス周期が検出されていないことや、ガンマ線放射が広がっていることから、パルサーからの放射がソースEへほとんど寄与していないと考えられます。また、SNRG8.31-0.09も重なっていますが、その領域でガンマ線が特に明るくないことから、これも放射へはほとんど寄与していないことがわかります。さらに、図3(b)で示すように分子雲からのCO輝線の強度分布が強い領域ともよく一致しており、ソースEはG8.7-0.1で加速された宇宙線と分子雲との相互作用で輝いているのが自然です。

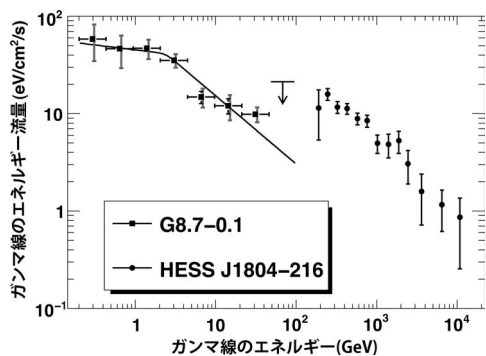


図4. LATで得られたG8.7-0.1ガンマ線エネルギースペクトル(0.2-100 GeV)とH.E.S.S.望遠鏡で得られたHESS J1804-214のガンマ線エネルギースペクトル(約0.2-10 TeV)¹⁵⁾. 縦方向の誤差は黒が統計誤差, グレーが系統誤差を表し, 矢印は90%信頼水準の上限値を示す. 黒の実線は, スムーズに折れ曲がるべき関数でフィットしたときのベストフィットの形状を示す.

一方で, ソースWはガンマ線パルサーであることが最近になって3年間のデータ解析の結果わかりました¹⁷⁾. 筆者らは解析していた当時, 約2年間のデータを使用していたので光子統計の不足からパルス周期を見つけることができませんでした⁹⁾. また他波長で対応天体がなかったためにGeVガンマ線未同定天体となっていました, ソースEに相関する分子雲とも重なっていたので, ソースWもG8.7-0.1と物理的に関係している可能性があると考えて, これらのガンマ線放射を合わせて解析を行いました. ただし, ソースEからのガンマ線放射が全体の放射の大半を占めているため, 今回紹介する結果や結論へ大きな影響はありません.

次にGeVガンマ線放射とTeVガンマ線放射との関係ですが, 図3(c)から両者は重なっていますが, 輝度分布が異なっているように見えます. このことを最尤法を用いて定量的に評価した結果, 両者の輝度分布はあまり相関していないことがわかりました. また, 図4に示すようにGeVガンマ線とTeVガンマ線のスペクトルは単一の

べき関数では再現できないこともわかりました. このことからTeVガンマ線放射が同一天体起源だとするとGeVガンマ線放射と別の放射機構による成分が混じっているか, あるいは全く別の天体からの放射であると考えられますが, これについては次節で議論します.

さて, 図4に示すようにG8.7-0.1のGeVガンマ線スペクトルには折れ曲がりが存在し, これまでフェルミが検出した分子雲と相互作用したSNRのものとよく一致しています. GeVガンマ線の放射機構について考察するために, スペクトルのモデル計算を行った結果, G8.7-0.1で加速された宇宙線陽子と分子雲との相互作用で生じた中性パイ中間子の崩壊ガンマ線によく説明できることがわかりました. 一方で, もしガンマ線が宇宙線電子起源の放射だとすると, 制動放射が卓越する場合には加速される電子の量が陽子とほぼ同程度でなければならず, 逆コンプトン散乱が卓越する場合には放射に寄与する宇宙線の総エネルギーが超新星爆発で解放される全運動エネルギーよりも大きくなってしまいます. よって, ガンマ線はG8.7-0.1が加速した電子で説明するのは難しく, さらに逆コンプトン散乱が支配的と考えられているパルサー星雲が起源であるという可能性も棄却されます. 以上から, G8.7-0.1でも宇宙線陽子が加速されており, さらにスペクトルに折れ曲がりが存在することがわかりました.

2.2 GeVガンマ線スペクトルの折れ曲がりと宇宙線の拡散

GeVガンマ線放射は陽子起源でよく説明できることがわかりましたが, スペクトルの折れ曲がりの起源は何でしょうか? 磁場消失説や反射衝撃波説だと衝撃波面に沿ったガンマ線の形状になりますが, LATの空間分解能では特定できないため, 空間構造から拡散説と区別することはできません. しかし, 先ほど述べたようにG8.7-0.1の近傍にはTeVガンマ線未同定天体HESS J1804-216が存在しており, そのTeVガンマ線スペク

トルの光子指数が2.72となっていて、SNRから宇宙線がエネルギーに依存して拡散した場合の理論予想⁵⁾とも一致しているという状況証拠から、筆者らは拡散説の可能性が高いと考えています*1.

宇宙線の拡散係数は粒子の運動量とともに増加するため、高エネルギーの宇宙線ほどより遠くまで拡散します。よって、G8.7-0.1が衝突している分子雲と比較的エネルギーが低い宇宙線との相互作用でGeVガンマ線が放射され、少し離れた場所にある別の分子雲と高エネルギー宇宙線とが相互作用してTeVガンマ線で輝いていると予想されます。そこで、TeVガンマ線放射が宇宙線の拡散によって説明できるかを定量的に検証するため、宇宙線の拡散係数を自由パラメーターとして多波長スペクトルのモデル計算を行い、観測データを再現する値が妥当であるかを評価しました。ここでは、SNRの誕生と同時に宇宙線が加速されると近似し、SNRの年齢が200年でエネルギーの高い宇宙線から徐々に拡散し始めるというモデル¹⁸⁾を用いました。また、G8.7-0.1の年齢でスペクトルの折れ曲がりに対応するエネルギーの宇宙線までが拡散すると仮定しました。モデル計算の結果、図5で示すようにTeVガンマ線スペクトルをよく再現することができました。

図5からわかるように、GeVからTeVまでのスペクトルは連続的につながっておらず、100 GeV-1 TeVで第2ピークがあるような構造をしています。このピークの位置はモデル計算から得られますが、SNRからTeVガンマ線に寄与する分子雲までの距離と拡散係数の比で決まっています。そのため、分子雲までの距離がわかると拡散係数を求めることができますが、地球からG8.7-0.1までの距離の推定には不定性があるため、分子雲の位置を精度よく特定することができませ

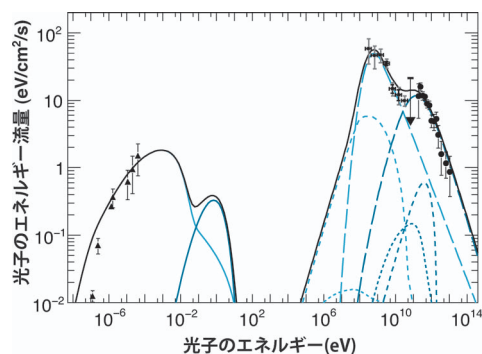


図5 多波長スペクトルの理論モデルと観測で得られたGeVガンマ線とTeVガンマ線スペクトルの比較。モデルは水色がGeVガンマ線に寄与する放射、青がTeVガンマ線に寄与する放射、黒が両者を足し合わせたもの。各モデルの実線はシンクロトロン放射、長破線が中性パイ中間子の崩壊ガンマ線、破線が制動放射、点線が逆コンプトン散乱。

ん。そこで、TeVガンマ線に寄与する分子雲が少なくともG8.7-0.1の半径(約26パーセク)よりも離れた位置にあると仮定し、拡散係数の下限値を求めました。

次に、拡散係数の上限値を求めます。TeVガンマ線のフラックスは、放射に寄与する分子雲の質量と分子雲に衝突する宇宙線のフラックスとの積で決まります。さらに、SNRで加速される宇宙線の総エネルギーが一定という条件では、拡散係数が大きくなると離れた分子雲での宇宙線フラックスは小さくなります。したがって、分子雲の質量の上限値が求まると拡散係数の上限値が決定できます。分子雲の質量の上限値はNANTENの分子線観測¹⁹⁾から約200万太陽質量と求まりました。観測と理論モデルの比較により制限された宇宙線の拡散係数は10 GeVで 10^{26} cm²/s程度となり、星間空間での理論値である約 10^{27-28} cm²/s²⁰⁾より1桁程度小さいものでした。しかし、分子雲が存在するような物質密度の濃い環境での理論

*1 TeVガンマ線の起源はパルサー星雲の可能性もあり、放射に寄与する電子の冷却時間の違いから、この領域でX線で観測されているパルサー星雲のサイズ(2分角以下)よりも大きく広がる可能性があります。

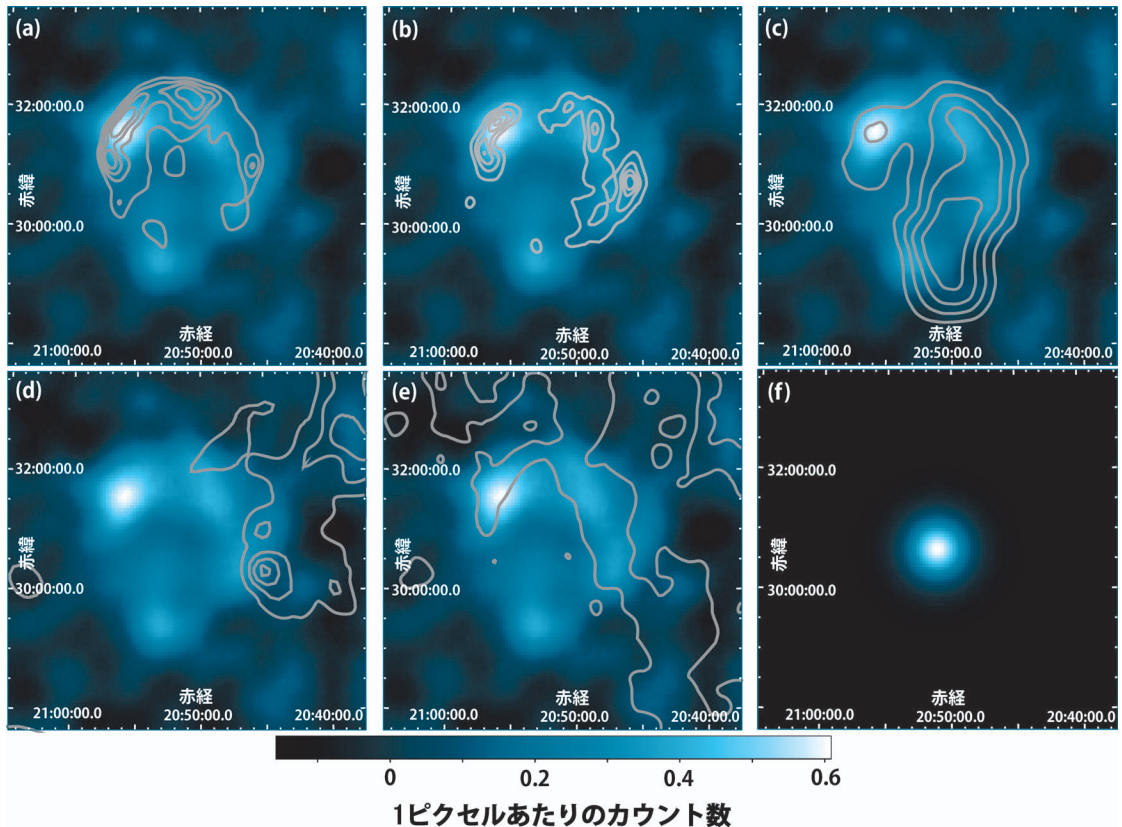


図6 白鳥座ループのバックグラウンドを差し引いた0.5–10 GeVのLATのイメージ。グレーの等高線は、(a)が衝撃波で熱化されたプラズマからのX線放射の強度分布、(b)がSNRの衝撃波がガス中を通過する際に放射されるH α 輝線の強度分布、(c)が電波(1420 MHz)の強度分布²⁴⁾、(d)が視線方向に位置する分子雲からの¹²CO (J=1–0)輝線の強度分布、(e)が視線方向に積分したダストからの放射の強度分布、(f)がLATでの点源像の広がりを示す。

値²¹⁾ とほぼ一致し、十分にありうる値であることがわかりました。今回のように宇宙線加速源近傍での拡散係数を求めることができた例はほとんどないため、非常に重要な結果と言えるでしょう。

以上より、TeVガンマ線は宇宙線の拡散で説明でき、G8.7–0.1のGeVガンマ線スペクトルの折れ曲がりには拡散説で自然に説明できることがわかりました。また、その条件下で拡散係数に制限を与えることができました。

3. 白鳥座ループ

3.1 白鳥座ループからのGeVガンマ線放射

白鳥座ループは年齢が約2万年程度と推定されている中年のSNR²²⁾で、電波やX線でシェル型の構造をもっています。このSNRは距離が約540パーセクと地球に非常に近く²³⁾、見かけの大きさが約3度もあるので、LATの空間分解能(1 GeVで約0.8度)でもガンマ線放射の空間分布を詳細に調べることができます。

まず初めに、さまざまな波長で得られたイメージとガンマ線イメージの比較をします。図6(a)

より、ガンマ線は衝撃波で熱化されたプラズマからのX線放射と重なっており、また図6(b) から衝撃波付近で中性粒子と宇宙線陽子との電荷交換や衝突励起によって放射されるH α 輝線と良い相関があることがわかります。さらに、図6(c) から北部のガンマ線が電波シンクロトロン放射とも相関しています。南部はあまり対応していませんが、これは視線方向に重なっている別のSNRからの放射と考えられる構造が見えています。次に分子雲との相関ですが、図6(d)に示すように明らかな相関は見られません。一方、図6(e)より赤外線放射の分布がガンマ線と重なっています。赤外線はダストや衝撃波で加熱された水素ガスなどの熱的放射によって放出されるため、衝撃波付近の物質の密度分布を大まかにトレースしていると考えられます。以上のことから、ガンマ線放射の大半は、衝撃波で加速された宇宙線と衝撃波付近の物質や放射場との相互作用により発生していると考えられます。

次にガンマ線の幾何学的な形状について最尤法を用いて定量的に調べました。その結果、リング状のモデルがガンマ線放射をよく再現できることがわかりました。また、いくつかの領域に分けてスペクトル解析を行いました。スペクトル形状は統計誤差の範囲内で一致しました。この結果を用いて、一様に放射されているリングの形状を仮定して、最尤法よりガンマ線のエネルギースペクトルを求めました。すると、図7で示すように折れ曲がりが見られ、統計的にも折れ曲がりがあることがわかりました。

得られたスペクトルからガンマ線光度を求めた結果、 10^{33} erg/s程度となり、フェルミで観測されている分子雲と相互作用したSNRの光度²⁵⁾よりも約1桁以上も暗いことがわかりました。SNRが分子雲と衝突していると宇宙線と相互作用する標的となる原子核が多く存在するので、ガンマ線が生成されやすく光度が高くなります。逆に、SNRが分子雲と相互作用していない場合は光度

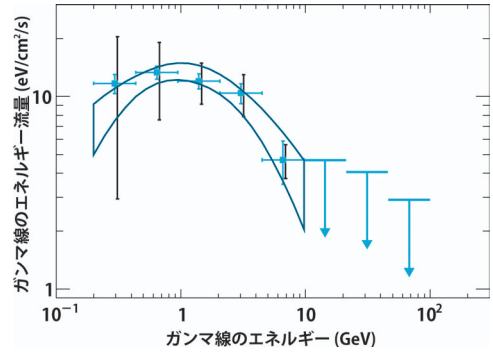


図7 白鳥座ループのGeVガンマ線エネルギースペクトル。水色は統計誤差を表し、矢印は90%信頼水準の上限値を示す。黒は系統誤差を表し、青は、スペクトル形状としてログパラボラを仮定したときのベストフィットから68%の信頼水準に含まれる領域。

が低くなりますが、LATでこのように周辺の物質密度が薄い環境にあるSNRからもガンマ線放射を検出できるようになってきたのは特筆すべきことでしょう。

3.2 GeVガンマ線の放射機構と折れ曲がったスペクトルの起源

折れ曲がりのあるガンマ線スペクトルは分子雲と相互作用したSNRに見られる共通の特徴で、陽子起源の放射で説明できました。それでは、分子雲と相関していない白鳥座ループにも見られたスペクトルの折れ曲がりとはどのような放射機構で説明できるのでしょうか？ 筆者らは可視光およびX線観測で得られる衝撃波付近の物質密度を仮定して、スペクトルのモデル計算を行いました。その結果、GeVガンマ線の放射機構は陽子起源でよく説明できることがわかりました。一方で、電子起源の放射で説明するにはいくつか問題がありました。まず、制動放射が卓越する場合には電波スペクトルの形状を説明することができません。次に逆コンプトン散乱が卓越する場合は、要求される物質密度が観測値の数百分の1程度となり、先ほどの仮定と矛盾してしまいます。以上より、分子雲と相関していない白鳥座ループでも、

分子雲と相互作用している SNR と同様に陽子起源の放射でよく説明できることがわかりました。

それでは、スペクトルの折れ曲がりほどのようにして生じるのでしょうか？ まず拡散説の可能性はかなり低いと言えます。なぜなら白鳥座ループの大部分は分子雲と相関していないので、ガンマ線放射の起源は逃げ出した宇宙線と分子雲との相互作用では説明できないためです。次に磁場消失説ですが、ガンマ線放射が $H\alpha$ 輝線の分布と重なっているので可能性があると考えられます。しかし、ガンマ線が実際に $H\alpha$ のようにフィラメント状になっているのかを調べるには LAT の空間分解能が不足しているので、決定的に結論づけることはできません。最後に反射衝撃波説ですが、現在のところ SNR の衝撃波が密度の濃い分子雲に衝突している場合しかシミュレーションされておらず、理論モデルと直接比較できません。しかし、可視光および X 線の観測から反射衝撃波が観測されている²⁶⁾ ので、この機構が働いている可能性があります。

以上より、白鳥座ループでは GeV ガンマ線スペクトルの折れ曲がり宇宙線の拡散以外の機構で生じている可能性が高く、分子雲と相互作用している G8.7-0.1 とは起源が異なるという示唆が得られました。

4. まとめと今後の展望

筆者らは、フェルミ衛星 LAT 検出器により SNRG8.7-0.1 と白鳥座ループの観測を行いました。その結果、これらの SNR からのガンマ線は、これまでフェルミで検出された分子雲と相互作用した SNR と同様に陽子起源でよく説明でき、そのスペクトルは GeV 帯域で折れ曲がりをもつことがわかりました。この折れ曲がりの起源は、G8.7-0.1 では宇宙線の拡散で自然に説明できることがわかりましたが、一方で白鳥座ループでは分子雲と相互作用してないことから拡散説の可能性が低く、衝撃波における磁場の消失か反射衝撃

波が寄与している可能性が高いことがわかりました。まだこのような研究が可能な SNR の数は多くありませんが、ひょっとすると SNR の周辺環境の違いなどによってスペクトルの折れ曲がりを生じさせる物理機構が異なっているのかもしれない。

現在フェルミ衛星によって 10 個以上の SNR から GeV ガンマ線が検出されており、その数はまだまだ増え続けています。これにより、SNR の年齢や周辺環境とガンマ線のスペクトル形状や光度などとの相関を系統的に議論できるようになりつつあり、スペクトルの折れ曲がりの起源解明に大きな手掛かりをもたらすと期待されます。折れ曲がりの起源を探ることは、SNR の衝撃波における粒子加速機構や加速された宇宙線の星間空間への拡散過程を理解することにつながるため、いつか SNR の進化なども考慮して宇宙線の起源について定量的な議論ができるようになるかもしれません。

謝辞

本稿で紹介した研究を遂行するにあたり、フェルミ衛星 LAT 検出器コラボレーションの方々、特に日本人メンバーの方々に多大な協力をいただきました。ここに感謝の意を表したいと思います。また、これらの研究は文部科学省科学研究費助成事業、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の援助を受けています。

参考文献

- 1) たとえば, Blandford R. D., Ostriker J. P., 1978, ApJ 221, L29
- 2) 釜江常好, 大杉 節, 2010, 巻頭言フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡, 天文月報 103, 314
- 3) たとえば, Abdo A. A., et al., 2009, ApJ 706, L1
- 4) 片桐秀明, 他, 2010, 天文月報, 103, 438
- 5) Aharonian F. A., Atoyan A. M., 1996, A&A 309, 917
- 6) Gabici S., Aharonian F. A., 2007, ApJ 665, L131
- 7) Uchiyama Y., et al., 2010, ApJ 723, L122
- 8) Inoue T., et al., 2010, ApJ 723, L108
- 9) Ajello M., et al., 2012, ApJ 744, 80
- 10) Katagiri H., et al., 2011, ApJ 741, 44
- 11) Ojeda-May P., et al., 2002, RevMexAA 38, 1110
- 12) Finley J. P., Oegelman H., 1994, ApJ 434, L25
- 13) Kassim N. E., Weiler K. W., 1990, ApJ 360, 184
- 14) Hewitt J. W., Yusef-Zadeh F., 2009, ApJ 694, L16
- 15) Aharonian F., et al. (The H.E.S.S. Collaboration) 2006, ApJ 636, 777
- 16) Brogan C. L., et al., 2006, ApJ 639, L25
- 17) Pletsch H. J., et al., ApJ, 744, 105
- 18) Gabici S., et al., 2009, MNRAS 396 1629
- 19) Takeuchi T., et al., 2010, PASJ 62, 557
- 20) Delahaye T., et al., 2008, Phys. Rev. D 77, 063527
- 21) Ormes J. F., Ozel M. E., Morris D. J. 1998, ApJ 334, 722
- 22) Miyata E., et al., 1994, PASJ 46, L101
- 23) Blair W., et al., 2005, AJ 129, 2268
- 24) Reich W., 1982, A&AS 48, 219
- 25) 内山泰伸, 2010, 天文月報 103, 735
- 26) Graham J. R., et al., 1995, ApJ 444, 787

Fermi-LAT Study of the Gamma-Ray Spectral Breaks in Supernova Remnants

Yoshitaka HANABATA

Department of Physical Sciences, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan

Hideaki KATAGIRI

College of Science, Ibaraki University, 2-1-1 Bunkyo, Mito 310-8512, Japan

Abstract: Galactic cosmic-rays are widely believed to be accelerated in the shock of supernova remnants (SNRs) by the diffusive shock acceleration (DSA) mechanism. *Fermi* Gamma-ray Space Telescope has recently been detected GeV gamma rays from several SNRs interacting with molecular clouds. The GeV emissions are naturally explained by the hadronic origin. In addition, the spectra of them exhibit spectral breaks above a few GeV, which is different from the prediction of DSA. The observations of G8.7-0.1 and Cygnus Loop provide us a suggestion that the spectral break might be caused by the difference of the environment surrounding SNRs.